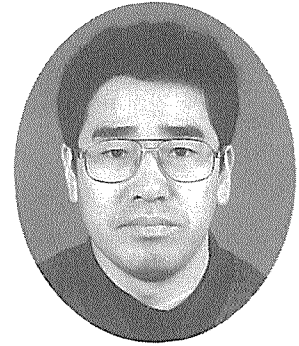


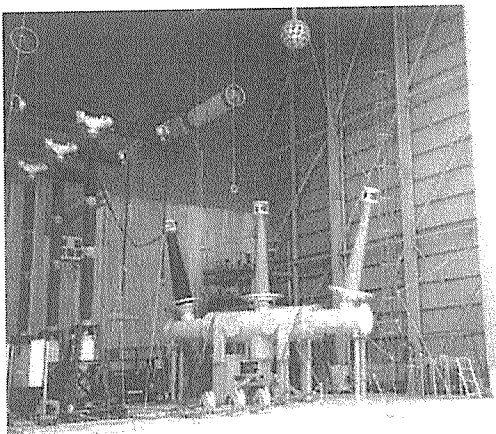
# 초고압 가스 차단기 차단성능 해석 기술



(주)효성 중공업 PG  
부장 송원표

## 1. 서론

전력 수요의 폭발적 증가에 따라 전력 계통의 송전압도 상승하고 있는 추세이며, 전압계통 345kV 계통에서는 이미 단락 전류가 정격 40kA를 넘어서는 부분이 나타나고 있고, 765kV 초고압 계통도 이미 송전 계통은 공사가 시작되고 있다. 특히 최근에는 초고압 변전소가 도입지 내에 건



(그림 1.1) 초고압 가스차단기

(Fig. 1.1) High Voltage Gas Circuit Breaker

설되고 있기 때문에 이러한 송전계통의 핵심인 초고압 차단기의 소형화, 고신뢰성화는 필수적이라 할 수 있다.

현재 GIS(Gas Insulated Switchgear)의 대용량화에 대한 기술 진보는 눈부시게 이루어지고 있으며, 특히 GIS 관련 수치 해석 기법의 발전은 제작 및 실험 이전에 이미 GIS의 차단 특성을 예측할 수 있을 정도로 그 정밀도가 높아지고 있다. GIS 설계 기술을 지원하는 각종 해석 기법으로서 는 아크, 모델을 이용한 차단 현상의 시뮬레이션과 같이 소호 과정에 대한 구조 요인, 물리량 등 각종 파라미터의 영향을 조사하는 요인 분석형의 해석 법과, 동작해석, 전계해석, 유동체 해석, 압력해석 등과 같이 소호에 필요한 분출 압력, 유속, 가스 밀도, 전계강도 등을 설계치에 맞추기 위한 해석 기법이 있다.

퍼퍼(puffer)식 가스 차단기는 대용량, 소형화가 가능하기 때문에 초고압 전력 계통에서 널리 사용되고 있으며, 이 형태의 차단기는 실린더 내의 SF6 가스의 압축에 의해 압력이 증가되며, 증가된 압력을 유효하게 이용하여 아크를 소호시키는



원리로 동작된다. 차단부 내에서 일어나는 아크 소호 메카니즘은 아크와 가스 유동의 상호 작용에 의해 매우 복잡하며 차단기의 최적 설계를 위해서는 이러한 아크 현상을 고려한 압력해석과 유동 해석이 필수적이다. 압력해석을 통해 차단부의 거시적인 현상을 파악할 수 있으며, 유동해석을 통해서 차단부 내부의 보다 자세한 밀도 및 압력 분포를 얻을 수 있다.

차단 과정에서 발생하는 아크의 거동을 파악하고 차단 특성을 해석하기 위해서는 유동 해석 프로그램에 아크 모델을 적절히 결합한 열가스 유동 해석 프로그램이 필수적이다. 아크는 복잡한 물리적 현상을 가지고 있기 때문에 수치적으로 정확히 표현하기는 어렵지만, 대전류 차단시의 차단 특성 해석을 위해서는 실험적 데이터를 기반으로 아크 물리량을 표현 할 수 있는 아크 모델링에 대한 연구가 필요하다.

소호실의 절연 설계 및 절연 회복 특성 등의 검토를 위해서는 수치 전계 해석 방법에 의해 소호실 각 부의 전계 해석이 필요하다. 특히 2차원으로 모델링 할 수 없는 3차원 형상에 대한 정확한 전계 해석을 위한 3차원 전계 해석 프로그램이 필요하다.

## 2. 유동해석

### 2.1 FVFLIC법

FVFLIC(Finite Volume Fluid In Cell)법에 의한 차단부 내의 냉가스 유동 해석의 기초 방정식은 Navier-Stokes 방정식에서 점성항을 없앤 오일러 방정식 (Euler Equation)이며, 이 식은 질량, 운동량 및 에너지 보존식을 나타낸다. 오일

러 방정식을 적분형으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V F dV + \int_S F U_n dS = - \int_S p V_m dS \dots\dots\dots (2.1)$$

여기서 V와 S는 임의의 체적과 이 체적의 표면을 나타내며, 3차원 직교 좌표계의 경우 방정식의 각 항들은 다음과 같다.

$$F = [ \rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho E ] \dots\dots\dots (2.2)$$

$$V_m = \vec{V}_p \cdot \vec{n} = [0, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k}, \vec{U}] \cdot \vec{n} \dots\dots\dots (2.3)$$

이 식에서  $\rho$  는 밀도, p는 압력, E는 총에너지, u, v, w는 속도 벡터  $\vec{U}$ 의 x, y, z 성분이다.  $\vec{n}$  은 표면에 수직인 외향 정규 법선 벡터이며,  $U_n$  은  $\vec{U} \cdot \vec{n}$  이다. 총에너지와 비내부 에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$E = I + \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \dots\dots\dots (2.4)$$

$$I = C_p T$$

주어진 밀도와 비내부 에너지로부터 압력을 구하기 위해서 다음과 같은 이상기체의 상태 방정식이 이용된다.

$$p = (\gamma - 1) \rho I \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\gamma = C_p / C_v$$

$C_p$  : 정압 비열,  $C_v$  : 정적 비열

임의의 6면체 검사 체적(Control Volume)에 대해, 유한 체적 이산화 원리를 적용하면, (2.1)

은 다음과 같은 대수 방정식으로 바뀐다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} \Delta V + \sum_{i=1}^6 [ F U_n \Delta S ]_i = - \sum_{i=1}^6 [ p V_{pn} \Delta S ]_i \quad (2.6)$$

여기서  $\Delta V$ 는 셀의 체적이며,  $\Delta S_i$ 는 6개 면의 임의의 면적이다.

FLIC(Fluic in Cell)법은 두 가지 특징이 있다. 하나는 계산 영역을 다수의 차분 격자로 분할할 때에 통상의 차분법에서는 격자점에서의 상태량 F(질량, 운동량, 에너지)를 구하지만, FLIC법에서는 각 격자 사이에 있는 셀 내부의 유체가 가지고 있는 F의 평균치를 취한다.

FLIC법의 두 번째 특징은 비정상 성분을 2단계의 전진 차분으로 치환하는 것이며, 먼저 첫 번째 단계에서는 압력 경도 분포에 의해서만 운동량 보존식과 관련된 상태량 F의 중도값(intermediate values)을 계산하고, 비내부 에너지의 중도값은 다음식과 같이 비보존 에너지 방정식의 압력항에 의해서만 계산이 된다.

$$\frac{\partial \rho I}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho I \vec{U}) = -p \nabla \cdot \vec{U} \quad (2.7)$$

### 첫 번째 단계

첫 번째 단계에서는 식(2.6)에서 대류항을 무시하고 유동 변수의 중도값들을 다음과 같이 계산한다.

$$\hat{F}(k) = F^{(n)}(k) - \frac{\Delta t}{\Delta V} \sum_{i=1}^6 [ p^{(n)} V_{pn}^{(n)}(k) \Delta S ]_i \quad (k=1,2,3,4) \quad (2.8)$$

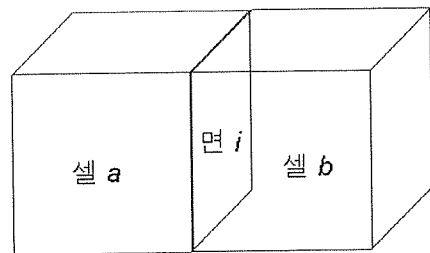
여기서 위첨자 n은 Lagrange 좌표계에서의 시간  $n\Delta t$ 에서의 값을 의미하며, 아래 첨자 i는 해당 셀의 임의의 6개 면을 나타내고,  $V_{pn} = \vec{V}_p \cdot \vec{n} = [ 0, n_x, n_y, n_z, U_n ]$ 이다.

여기서  $n_x, n_y, n_z$ 는 셀 표면의 외향 정규 법선 벡터의 세 성분이며,  $U_n$ 은 법선 벡터 방향의 속도 성분이다.

여기서 주의할 것은 비록 밀도는 식(2.8)에 포함되어 있지만  $V_{pn}(1) = 0$ 이기 때문에 이 계산 과정에서는 바뀌지 않는다는 점이다. 또한 첫 번째 과정에서 셀 표면에서의 모든 양들은 중앙 차분 기법에 의해 계산되며, 이는 셀 표면을 공유하는 두 개의 인접 셀의 값을 이용한다. 예를 들어 그림 2.1에서 셀 표면에서의 압력은 셀 표면 i를 공유하는 두 개의 셀 a, b의 값으로부터 보간에 의해 구해지며, 여기서는 두 셀의 체적을 이용하여 다음식에 의해 보간하였다.

$$p_i = \frac{V_b p_a + V_a p_b}{V_a + V_b} \quad (2.9)$$

여기서  $V_a, V_b$ 는 셀 a, b의 체적,  $p_a, p_b$ 는 셀 a, b 내부에서의 압력을 나타낸다.



(그림 2.1) 셀 및 셀의 경계면 정의  
(Fig. 2.1) Definition of cells and cell interface

내부에너지의 중도값은, 식(2.7)에서 압력은 셀 내부에서 일정하다는 가정 하에 다음과 같은 적분 형으로 바꾸어 계산한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho I dV + \int_S \rho I U_n dS = -p \int_S U_n dS \dots\dots\dots (2.10)$$

얻어진 수치 해석결과의 정확도는 일을 표현하는 항  $-p \nabla \cdot \vec{U}$  를 어떻게 처리하느냐에 따라 많이 달라진다. 여기서 사용하는 방법은 계산 과정에서 비내부 에너지가 음이 되는 것을 막아준다. 식(2.10)을 검사체적에 대해서 이산화하고, 대류항을 제거하면 다음과 같은 단위 체적당의 내부 에너지의 중도값이 얻어진다.

$$\overline{(\rho I)} = (\rho I)^{(n)} - \frac{\Delta t}{\Delta V} \sum_{i=1}^6 [p^{(n)} (\bar{U}_i)_m \Delta S_i] \dots\dots\dots (2.11)$$

여기서  $\bar{U}_i$  는 초기값과 중도값의 평균값으로 다음과 같다.

$$\bar{\vec{U}} = \frac{\vec{U}^{(n)} + \vec{U}}{2}, (\bar{U}_i)_m = \bar{U}_i \cdot \vec{n} \dots\dots\dots (2.12)$$

여기서 주의할 것은 첨자  $i$  는 셀 표면에서의 값을 의미하며, 첨자  $i$  가 없는 경우는 셀 중심에서의 값을 의미한다. 또한 표면에서의 값은 중앙 차분에 의해 인접한 두 셀의 값을 보간하여 구한다.

두 번째 단계

두 번째 단계에서는 모든 셀에서의 각 상태량들

의 새로운 값들이, 질량, 운동량 및 에너지 보존법칙으로부터 첫 번째 단계에서 구한 중도값과 오로지 대류항만에 의한 영향을 가지고 계산된다. 첫 번째 단계에서 얻은 Lagrange 좌표계에 있어서의 상태값을 다음 식을 이용하여 Euler 좌표계의 상태값으로 계산한다.

$$F^{(n+1)}(k) = \hat{F}(k) - \frac{\Delta t}{\Delta V} \sum_{i=1}^6 [\delta_i \hat{F}_b(k) + (1 - \delta_i) \hat{F}_a(k)] \bar{U}_i \Delta S_i (k = 1, \dots, 5) \dots\dots\dots (2.13)$$

여기서 아래 첨자 a는 계산 셀을, b는 변  $i$  를 통해 인접한 이웃 셀을 의미한다.

위의 식에서  $\delta_i$  는 차분법에서 상류차분 파라미터로 불리우며, 여기서는 다음과 같은 값을 사용하였다.

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & : \bar{U}_i < 0 \\ 0 & : \bar{U}_i > 0 \end{cases} \dots\dots\dots (2.14)$$

2.2 FVFLIC법에 의한 축대칭 오일러 방정식의 해석

축대칭인 경우의 오일러 방정식은 원주 방향으로의 변화가 없다고 가정하기 때문에 운동량 보존식에서  $\theta$  성분이 없는 다음의 식으로 표현이 된다.

질량 보존 법칙 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \dots\dots\dots (2.15)$$

운동량 보존 :

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{U}) = -(\nabla P)_z \quad (z \text{ 방향})$$

..... (2.16)

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{U}) = -(\nabla P)_r \quad (r \text{ 방향})$$

..... (2.17)

에너지 보존 :

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \vec{U}) = -\nabla \cdot (\rho \vec{U})$$

..... (2.18)

원통 좌표계에서  $\vec{A} = A_r \vec{r} + A_\theta \vec{\theta} + A_z \vec{z}$  라고 하면, 축대칭의 경우  $\theta$  성분에 대한 미분값은 0이므로 다음의 벡터 계산식이 주어진다.

$$\nabla \cdot \vec{A} = \frac{\partial A_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r A_r)}{\partial r}$$

..... (2.19)

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial z} \vec{z} + \frac{\partial f}{\partial r} \vec{r}$$

..... (2.20)

여기서  $f$  는 임의의 스칼라 함수를 나타낸다.

위의 벡터 계산식을 이용하면 질량보존, 운동량 보존 및 에너지 보존식은 축대칭인 경우 다음의 식으로 표현이 된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho r v}{\partial r} + \frac{\partial \rho u}{\partial z} = 0$$

..... (2.21)

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial z} + \frac{\partial \rho u v}{\partial r} + \frac{\rho u v}{r} + \frac{\partial P}{\partial z} = 0$$

..... (2.22)

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v}{\partial z} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial r} + \frac{\rho v^2}{r} + \frac{\partial P}{\partial r} = 0$$

..... (2.23)

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u E}{\partial z} + \frac{\partial \rho v E}{\partial r} + \frac{\rho E v}{r} + \frac{\partial P u}{\partial z} + \frac{\partial P v}{\partial r} + \frac{P v}{r} = 0$$

..... (2.24)

여기서  $u, v$  는  $z$  와  $r$  방향의 속도 성분,  $\rho$  는 밀도,  $P$  는 압력,  $E$  는 비총에너지(specific total energy)를 나타낸다.

이제 FVFLIC(Finite Volume Fluid in Cell)법에 의한 축대칭 이산화 과정을 살펴보자. FLIC법은 2단계의 계산 과정에 의해 각 유동의 상태량을 계산하며, 첫 단계에서 중도값이 구하여지면 각 셀에서의 새로운 상태량은 식(2.13)에 의해 구할 수 있다.

먼저 질량 보존식 (2.15)에서 대류에 의한 항  $\nabla \cdot (\rho \vec{U})$  을 무시하고 유한 체적법에 의해 이산화하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV = \frac{\hat{\rho} - \rho^{(n)}}{\Delta t} \Delta V = 0$$

..... (2.25)

여기서  $\hat{\rho}$  는 밀도의 중도값,  $\rho^{(n)}$  은 스텝 (n)에서의 밀도값이다.

이 식에서 알 수 있듯이 밀도의 중도값은 이전 스텝의 밀도값과 같음을 알 수 있다.

다음으로 운동량의  $z$  성분에 대한 이산화과정은 다음과 같다. 식(2.16)에서 대류항을 무시하고 유한 체적 이산화 과정을 적용하며, 축대칭의 경우  $dV = 2\pi r dr dz$  를 이용하면 다음식이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho u dV = - \int \frac{\partial P}{\partial z} dV$$

..... (2.26)

$$\frac{\widehat{\rho u} - (\rho u)^{(n)}}{\Delta t} \Delta V = - \int \frac{\partial P}{\partial z} 2 \pi r dr dz$$

$$= -2\pi \sum_{i=1}^4 P_i r_i l_i n_z$$

..... (2.27)

따라서 z 방향의 운동량의 증도값은 다음과 같다.

$$\widehat{\rho u} = (\rho u)^{(n)} - \frac{\Delta t}{S_k R_c} \sum_{i=1}^4 P_i r_i l_i n_z$$

..... (2.28)

여기서  $\widehat{\rho u}$  는 z 방향 운동량의 증도값,  $(\rho u)^{(n)}$  은 스텝 (n)에서의 운동량이며, 다른 변수들은 각각 다음과 같이 정의된다.

$\Delta V = 2 \pi S_k R_c$  는 k번째 셀의 체적

$S_k$  는 셀 면적

$R_c$  는 z축에서 셀 중심까지의 거리

$P_i$  는 i번째 변에서의 압력

$r_i$  는 z축에서 i번째 변의 중심까지의 거리

$l_i$  는 변의 길이

$n_z$  는 변의 정규외향법선 벡터의 z성분을 나타낸다.

다음으로 r 방향으로의 운동량 보존식 (2.17)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho v dV = - \int \frac{\partial P}{\partial r} 2 \pi r dr dz$$

..... (2.29)

오른쪽 항의 적분 계산을 위해서 식(2.30)을 이용하면, 식(2.29)는 식(2.31)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial(rP)}{\partial r} - \frac{P}{r}$$

..... (2.30)

$$\frac{\widehat{\rho v} - (\rho v)^{(n)}}{\Delta t} \Delta V = - \int \frac{1}{r} \frac{\partial(rP)}{\partial r} 2 \pi r dr dz$$

$$+ \int \frac{P}{r} 2 \pi r dr dz$$

$$= -2\pi \sum_{i=1}^4 P_i r_i l_i n_r + \frac{P_c}{R_c} \Delta V$$

..... (2.31)

따라서 r방향 운동량의 증도값은 다음과 같다.

$$\widehat{\rho v} = (\rho v)^{(n)} - \frac{\Delta t}{S_k R_c} \sum_{i=1}^4 P_i r_i l_i n_r + \frac{\Delta t}{R_c} P_c$$

..... (2.32)

여기서  $\widehat{\rho v}$  는 r방향 운동량의 증도값,  $(\rho v)^{(n)}$  은 스텝 (n)에서의 운동량이며,  $n_r$  은 변의 정규외향 법선 벡터의 r성분을,  $P_c$  는 (n)스텝에서의 셀 내부의 압력을 나타낸다.

내부에너지의 증도값은, 식(2.18)에서 압력은 셀 내부에서 일정하다는 가정 하에 다음과 같은 적분형으로 바꾸어 계산한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho I dV = - P \int_S U_n dS$$

..... (2.33)

$$\frac{\widehat{\rho I} - (\rho I)^{(n)}}{\Delta t} \Delta V = - P_c \sum_{i=1}^4 (\overline{U}_i)_{mi} 2\pi r_i l_i$$

..... (2.34)

따라서 내부 에너지의 중도값은 다음과 같다.

$$\widehat{\rho I} = (\rho I)^{(n)} - \frac{\Delta t P_c}{S_k R_c} \sum_{i=1}^4 (\overline{U}_i)_{ni} r_i l_i \quad (2.35)$$

여기서  $\overline{U}_i$  는 스텝(n)에서의 값과 중도값의 평균값으로 다음과 같다.

$$\overline{U} = \frac{\vec{U}^{(n)} + \vec{U}}{2}, (\overline{U}_i)_{ni} = \overline{U}_i \cdot \vec{n} \quad (2.36)$$

여기서 주의할 것은 첨자  $i$  는 셀 표면에서의 값을 의미하며, 첨자  $i$  가 없는 경우는 셀 중심에서의 값을 의미한다. 또한 표면에서의 값은 중앙 차분에 의해 인접한 두 셀의 값을 보간하여 구한다.

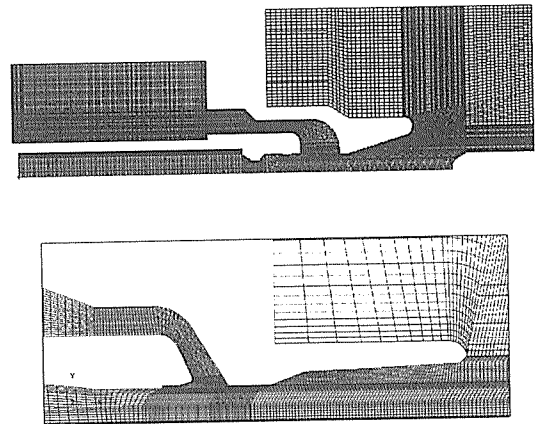
식(2.35)에 의해 내부 에너지의 중도값이 계산되어지면 총에너지의 중도값은 다음 식에 의해 계산된다.

$$\widehat{\rho E} = \widehat{\rho I} + \frac{1}{2} \widehat{\rho} (\widehat{u}^2 + \widehat{v}^2) \quad (2.37)$$

### 2.3 유동해석 프로그램의 적용

해석에 필요한 차단부 형상은 축대칭이며, 유동 해석시 중요한 부분은 노즐, 실린더실 및 고정 전극이다. 노즐과 고정 전극 사이에는 아주 작은 갭이 있으며, 고정 전극이 노즐 부분을 빠져나가기 전에는 이 부분으로 아주 빠른 속도의 유동이 형성되기 때문에 정확한 해석을 위해서는 이 부분을

정확히 모델링 하여야 한다. 아래의 그림 2.3은 이러한 차단부 유동해석을 위한 모델링을 나타낸 것이다. 그림 2.3과 같이 실제 형상에 최대한 가깝게 모델링된 차단부는 차단 동작시 이동을 고려하기 위해 전체 해석 영역을 5~6개의 영역으로 나누어 구분하게 된다.

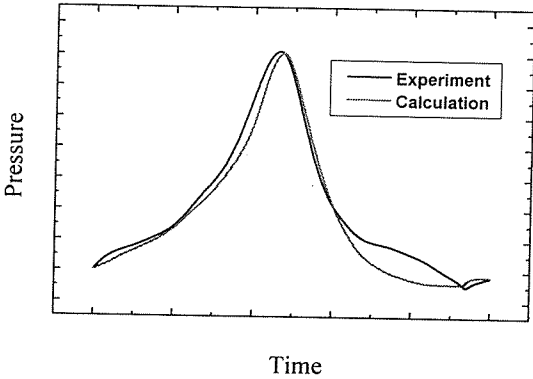


(그림 2.3) 유동해석용 차단부 모델링  
(Fig. 2.3) The modelling of the interrupter for fluid analysis (Type B)

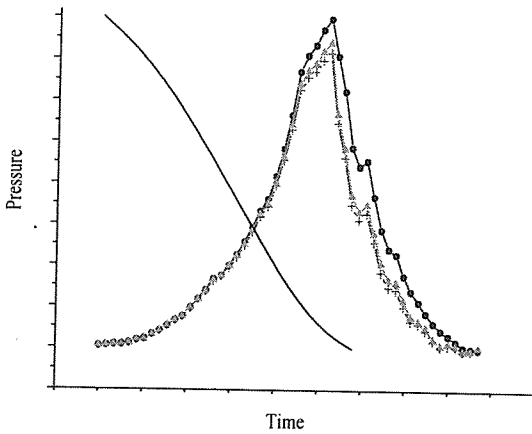
그림 2.4는 이러한 모델링을 통한 퍼퍼실 피스톤 전면의 압력분포와 실제 실험을 통한 압력분포와의 비교를 나타낸 것이다. 해석으로 얻은 압력과 실험을 통해 얻은 압력값들이 스트로크 후반부를 제외하고는 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 형상이 비슷하게 모델링을 했지만 해석 영역은 실제와 차이가 있고, 사용된 방정식이 Navier-Stokes 방정식에서 점성항이 무시된 오일러 방정식을 사용했기 때문이라고 생각할 수 있다.

그림 2.5는 해석에 사용된 차단기에서 노즐부와 아크접촉자 치수 등을 변경하면서 해석하여 얻은

압력분포이다. 압력분포가 가장 높은 경우는 아크 접촉자의 노즐 경을 3mm 정도 줄인 경우의 결과이며, 유동의 분출면적 감소에 의해 다른 경우에 비해 압력이 상승하는 것을 알 수 있다.



(그림 2.4) 퍼퍼실 전면의 압력비교 (Type A)  
(Fig. 2.4) Comparison of the pressure in front of the piston (Type A)

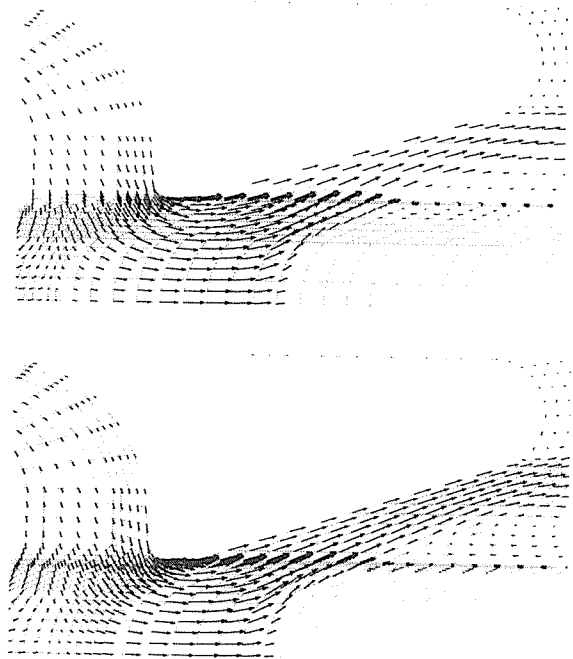


(그림 2.5) 조건변화에 따른 퍼퍼실 압력분포 (Type B)  
(Fig. 2.5) Pressure distributions with various conditions (Type B)

그림 2.6은 아크접촉자의 직경을 변경하여 해석

한 결과 중 한 시각에서의 노즐과 아크접촉자 사이를 통과하는 가스의 속도 벡터를 나타낸 것이다. 그림과 같이 노즐목을 통과하면서 압축된 가스가 팽창하면서 속도가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 압축성 기체가 수축-팽창 노즐을 통과하는 경우 고압측과 저압측의 압력비가 일정비 이하인 경우에 나타나는 전형적인 현상이다. 이러한 급격한 속도 증가는 밀도의 급격한 감소를 가져오게 되며, 속도가 음속보다 큰 경우 노즐 하류장 부근에서 충격파가 발생하게 된다.

그림 2.9는 고정 전극 선단에서 해석 스텝에 따른 압력 변화를 보여 준다. 스텝 60까지는 압력이



(그림 2.6) 속도벡터 분포 비교 (time=13.9ms) (Type B)

(Fig. 2.6) The comparison of distribution of the velocity vector (time=13.9ms) (Type B)





$$P = \rho RT \dots\dots\dots (3.1)$$

하여 각 시간스텝에 대한 해를 구할 수 있다.

여기서, P와 ρ, R, T는 각각 가스압력과 가스 밀도, 기체상수, 가스온도를 각각 의미한다.

차단부의 개극 동작시간은 수십 msec로 매우 짧기 때문에 퍼퍼실 내의 압축과정 동안의 열전달은 무시하여 단열압축과정이라고 생각할 수 있으며, 이 때의 퍼퍼실 내부의 가스 압력은 다음과 같이 표시된다.

$$P = \left(\frac{G}{V}\right)^k \cdot \left(\frac{V_o}{G_o}\right) \cdot P_o \dots\dots\dots (3.2)$$

여기서, 하첨자는 초기상태를 의미한다. 또한, 퍼퍼실 내부를 검사체적으로 고려하면, 노즐로 분출되는 가스의 유량만큼 검사체적의 질량과 부피가 감소하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dG}{dt} = -S_n \cdot \rho \cdot w \dots\dots\dots (3.3)$$

$$V = V_o - S \cdot x \dots\dots\dots (3.4)$$

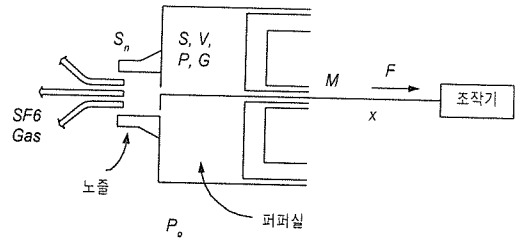
마지막으로 검사체적의 운동량 보존은 다음과 같이 표현된다.

$$M \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = F - (F_o + F_s) \dots\dots\dots (3.5)$$

이와 같은 식들은 연계된 시간에 대한 1차 미분 방정식의 형태이므로, Runge-Kutta 방법을 사용

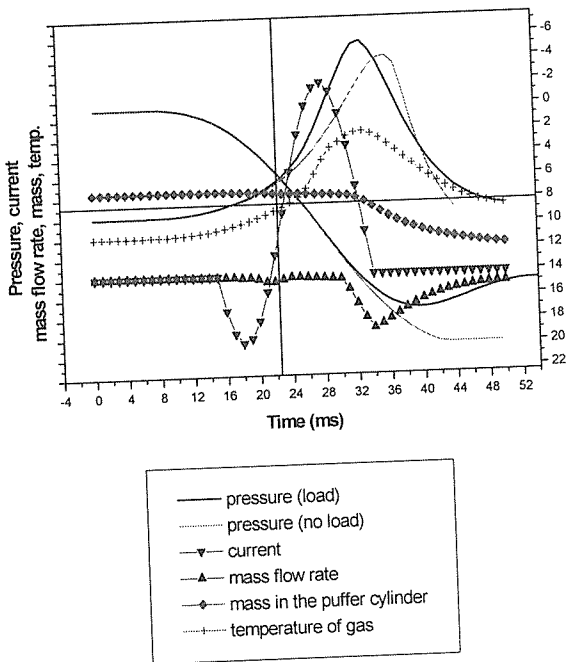
〈표 3.1〉 압력해석에 필요한 변수들  
〈Table 3.1〉 Variables for pressure analysis

기호	의 미	기호	의 미
S	퍼퍼실 단면적	W	가스 토출유량
V	퍼퍼실 부피	ρ	토출가스 밀도
P	퍼퍼실 가스 압력	F	조작력
G	퍼퍼실 가스 중량	x	스트로크
P <sub>o</sub>	가스 충전압력	M	가동부 총중량
S <sub>n</sub>	노즐 토출부 단면적		



(그림 3.1) 압력해석을 위한 차단부 모델링  
(Fig. 3.1) Interrupter modeling for pressure analysis

그림 3.2는 이러한 해석방법을 통해 얻어진 압력해석 결과이다. 전류가 가해지는 유부하 해석결과에서 퍼퍼실 압력과, 인가전류, 스트로크 곡선, 퍼퍼실 내부의 질량과 유출되는 질량유량을 나타내었다. 압력과 스트로크의 경우에는 무부하시의 결과와 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 전류에 의해 퍼퍼실 압력이 상승하고, 스트로크 후반에 반력이 증가하여 스트로크의 진행을 억제하는 것을 알 수 있다.



(그림 3.2) 무부하 및 유부하 압력해석 결과  
(Type B)

(Fig 3.2) The results of pressure analysis  
unser load, no load conditions (Type B)

#### 4. 맺음말

차단기는 형상이 복잡하고 매우 짧은 시간에 초음속 유동이 발생하며, 동시에 전극이 이동하는 구조이기 때문에 해석에 많은 어려움이 있다. 특히 전류가 통전되는 유부하시에는 아크의 영향까지 고려해야 하기 때문에 어려움이 가중된다.

이러한 차단기 내의 차단성능을 해석하기 위해서는 차단부 내의 유동해석, 압력해석, 전계해석 등이 필수적이며, 여기서는 다양한 해석 중 압력해석과 냉가스 유동해석에 대해 간단히 소개하였다. 압력해석을 통해서서는 거시적인 관점에서 차단부

해석을 통한 포괄적인 해석결과를 얻었으며, 유동해석을 통해서서는 많은 수의 격자로 분할된 차단부에 실제 유체 방정식을 적용하여 좀 더 자세한 차단부의 거동에 관한 결과를 구하였다.

유동해석에서는 FVFLIC법을 이용하여 비점성 오일러 방정식의 해를 구하였으며, 전극 이동에 따른 해석 영역 변화를 고려하기 위해 피스톤 앞면의 셀은 스트로크에 따라 제거하고 고정 전극 앞부분에는 셀을 추가하는 방법을 이용하였다. 현재 유동해석과 압력해석의 정확도를 검증하기 위해 지속적인 실험이 진행되고 있으며, 아크가 발생하는 대전류 차단성능에 관한 해석적 연구도 계속 수행되고 있다.

#### 참고문헌

- [1] Y. Zhao and D.E. Winterbone, "The Finite Volume FLIC Method and its Stability Analysis", Int. J. Mech. Sci. Vol. 37 No. 11, pp 1147~1160, 1995
- [2] 최 영길, 송 기동, 박 경엽 외, "가스차단부내 유동해석 프로그램의 적용 및 신뢰성 평가", 제3회 전력기기 심포지움 논문집, 1999
- [4] 신 병록, 장 근식, 조 강래, "전산유체역학", 대영사, 1994
- [5] F.Endo, M.Sato, M.Tsukushi, Y. Yoshioka, K.saito and K.Hirasawa, "Analytical Prediction of Transient Breakdown Characteristics of SF6 Gas Circuit Breakers", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.4, No. 3, pp. 1731-1737, July 1989.
- [6] (주)효성 중공업연구소, "Puffer형 SF6 가스

차단기의 차단성능 예측기술에 관한 연구”, 연구과제 보고서

[7] (주)효성 중공업연구소, “공기조작식 GCB의 무부하 동작특성연구”, 연구과제 보고서

[8] 박경엽, 송기동, 송원표 외, “무부하시의 초고압 GB의 파퍼실린더 내부의 상승압력 계산”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1559~1561, 1994

